日本機械学会論文集(C 編)
64 巻 618 号(1998-2)

論文 No. 97-0716

ノイズを考慮した接触パラメータの同定*

山田 貴孝*1, 毛利 哲也*2
三村 宣治*3, 舟橋 康行*1

Identification of Contact Conditions from Contaminated Data

Takayoshi YAMADA, Tetsuya MOURI,
Nobuharu MIMURA and Yasuyuki FUNAHASHI

When the grasped object is in contact with external environment, it is necessary to perform the assembly tasks with identification of contact conditions. In the previous paper, we proposed an algorithm for the identification by using pure data. This paper treats the case when the data are contaminated with noise. We provide mutual relationships among criteria, and clarify properties of the criteria. We establish an algorithm for the identification.

Key Words: Robot Hand, Multi-Fingered Hand, Contact Point, Parameter Identification, Unknown Contact Condition, Contaminated Data

1. 緒　　言

今日, 生産ラインの自動化に伴い, 多くのロボットが生産現場に導入されている. しかし, プレイバック式の位置制御の産業用ロボットであるため, 対象物の位置誤差を許容できない. このため組立のように把握対象物と外部環境との間で接触が生じ, 作業目標と異なった接触状態に陥った場合, どの接触状態にあるのか判別がつかず, 作業を完遂することができない. これに対し, 人間は手先の感覚(力覚)だけからでも接触状態を判別し作業を完了できる. そこで, 人間が無意識に行っているそれをロボットに応用し, 接触状態を判別することは自動化のために重要である.

これまでに, 複数回のセンシング動作(アクティブセンシング)を利用し, 形状が未知である対象物の接触位置を検出する方法を永田(1), 北垣(2), 三村(3) および舟橋(4) らが提案している. しかし, これらの方法では, 摩擦のある点接触の場合のみを対象としている. そこで著者ら(5)(6) は点接触以外の接触状態としてソフトフィンガ接触, 線接触, 面接触をも同定する問題を考察し, 形状が未知である対象物の接触点位置および接触状態が検出できることを明らかにした. 各接触状態の拘束条件を考慮した定式化を行い, 必要な計測回数との関係から, 接触状態を効率よく同定するアルゴリズムを提案した. 文献(5), (6)では計測データにノイズ等を含まない場合を考察している.

本報では, 計測データにノイズ等が含まれている場合の接触状態の同定問題を考察する. ノイズを含む場合, 次の考え方で接触状態を同定する. まず, 接触状態に対応する評価関数を与える. 次にこの評価関数を最小にするパラメータを求め, このパラメータにおいて評価関数が最小になる接触状態を求めることになる. ところが, 点, ソフトフィンガ, 線, 面接触になるに従い未知パラメータの数が増え, 評価関数の値は小さくなる. この点を考慮して, 接触状態の同定問題を考える.

まず 2 章において問題の設定を行う. 3 章では接触状態に対応する評価関数を与え, 未知接触パラメータを求める. 接触状態を表現する方程式が線形の場合には最小二乗法により未知パラメータを求める. また, 非線形の場合には文献(6)の方法で初期値を求めた後, 評価関数を最小化する未知パラメータを繰返しの

* 原稿受付　1997 年 4 月 22 日.
*1 正員, 名古屋工業大学 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町).
*2 学生員, 名古屋工業大学大学院.
*3 正員, 新潟大学 (〒950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050).

計算により求める．4章では評価関数の関係を述べ，計測されたデータに対して各評価関数がどのような特性を持つか示す．これをもとに接触状態を同定するためのアルゴリズムを提案する．5章では数値例を用いて本アルゴリズムの有効性を示す．

2. 問題の設定

本論文では文献(6)の定式化をもとに計測データにノイズを含む場合の同定法を考察する．3章以降の解析のため，2章では基礎となる方程式を導出する．

2・1 仮定 図1に示すように形状の未知な対象物をロボットハンドで把握し，対象物が外部環境に接触している状態を考える．次の仮定のもとで接触状態の同定を考察する．すなわち，対象物はロボットハンドにより完全に拘束され三次元空間を自由に操ることができる．またロボットは6自由度構造であって，センサ原点での力および位置の計測・制御が可能である．ただし，観測ノイズはモーメントの計測量のみに含まれるとする．対象物と外部環境は摩擦のある点接触，ソフトフィンガ接触[7]，線接触，または面接触のいずれかであり，接触点では滑りが生じない．このとき，接触点の位置および接触の状態を決定することを考察する．ただし，アクティブセンシングにより接触状態が変化することはないとする．

2・2 座標系の設定 図1に示すようにロボット先端のセンサ原点をo，点oに固定したセンサ座標系をΣ_oとする．また，接触点(線接触等のように接触が1点でない場合には接触線上の任意の点)をcとし，点cに固定した座標系をΣ_cとする．なお，座標系Σ_cの姿勢はΣ_oのそれと同じとする．Σ_oの原点から接触点cまでの位置ベクトルを$\boldsymbol{r}_c \in R^3$，接触によって点oおよび点cに作用する力とモーメントをそれぞれ$\boldsymbol{f}_o \in R^3$, $\boldsymbol{n}_o \in R^3$および$\boldsymbol{f}_c \in R^3$, $\boldsymbol{n}_c \in R^3$とする．外積を×で表すと，これらの物理量の間にはノイズが存在しない場合，次の関係式が成立している．

$$\boldsymbol{f}_c = \boldsymbol{f}_o \quad \cdots\cdots (1)$$

$$\boldsymbol{r}_c \times \boldsymbol{f}_c + \boldsymbol{n}_c = \boldsymbol{n}_o \quad \cdots\cdots (2)$$

ここで，$\boldsymbol{f}_o$, $\boldsymbol{n}_o$は既知(検出可能)物理量であり，$\boldsymbol{r}_c$, $\boldsymbol{n}_c$は同定すべき未知物理量である．接触状態を同一に保ったままでk回のアクティブセンシングをすることにより得られる関係式は式(1)，(2)より次のようになることを文献(6)で示した．

$$A_i \boldsymbol{x} + \boldsymbol{n}_{ci} = \boldsymbol{b}_i, \quad i = 1, 2, \cdots, k \quad \cdots\cdots (3)$$

ただし，

$$A_i = \begin{bmatrix} A_{i1} \\ A_{i2} \\ A_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a_{i3} & -a_{i2} \\ -a_{i3} & 0 & a_{i1} \\ a_{i2} & -a_{i1} & 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} a_{i1} \\ a_{i2} \\ a_{i3} \end{bmatrix} = \boldsymbol{f}_{oi}$$

$$\boldsymbol{b}_i = \begin{bmatrix} b_{i1} \\ b_{i2} \\ b_{i3} \end{bmatrix} = \boldsymbol{n}_{oi}, \quad \boldsymbol{n}_{ci} = \begin{bmatrix} n_{ci1} \\ n_{ci2} \\ n_{ci3} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \boldsymbol{r}_c$$

添字iはi回めのセンシングデータを意味する．

2・3 接触点におけるモーメントの拘束条件 点接触，ソフトフィンガ接触，線接触，面接触の接触状態を考えるとき，接触点でのモーメント$\boldsymbol{n}_{ci}$は一般性を失うことなく次の8種類に分類して考察すればよいことを文献(6)で示した．

[$\boldsymbol{n}_{ci}$の表現]

点接触：

$$\boldsymbol{n}_{ci} = 0 \quad \cdots\cdots (4)$$

ソフトフィンガ接触：

① $\boldsymbol{n}_{ci} = [1 \quad 0 \quad 0]^T z_i \quad \cdots\cdots (5)$

② $\boldsymbol{n}_{ci} = [y \quad 1 \quad 0]^T z_i \quad \cdots\cdots (6)$

③ $\boldsymbol{n}_{ci} = [y_1 \quad y_2 \quad 1]^T z_i \quad \cdots\cdots (7)$

線接触：

① $\boldsymbol{n}_{ci} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots (8)$

② $\boldsymbol{n}_{ci} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & y & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots (9)$

③ $\boldsymbol{n}_{ci} = \begin{bmatrix} y_1 & 1 & 0 \\ y_2 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots (10)$

面接触：

$$\boldsymbol{n}_{ci} = [z_{i1} \quad z_{i2} \quad z_{i3}]^T \quad \cdots\cdots (11)$$

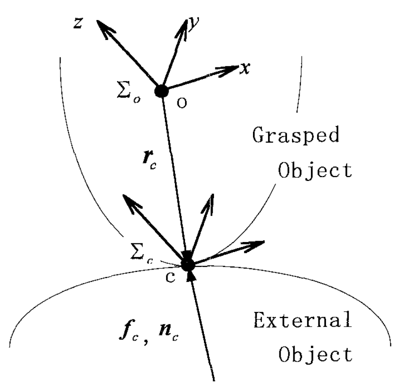


Fig. 1 Interaction between grasped object and external environment

3. 未知パラメータの同定

本論文では仮定より$\boldsymbol{n}_o$のみに観測ノイズが含まれる場合の接触状態同定問題を考える．このノイズを$\boldsymbol{\varepsilon}$とおくと式(3)は

$$A_i \boldsymbol{x} + \boldsymbol{n}_{ci} = \boldsymbol{b}_i - \boldsymbol{\varepsilon}_i, \quad i = 1, 2, \cdots, k \quad \cdots\cdots (12)$$

となる．誤差$\boldsymbol{\varepsilon}_i$は未知であるので

$$J=\sum_{i=1}^{k}\|A_i\boldsymbol{x}+\boldsymbol{n}_{ci}-\boldsymbol{b}_i\|^2 \quad\cdots\cdots(13)$$

を最小にする未知パラメータ $\boldsymbol{n}_{ci}$, $\boldsymbol{x}$ を求めることにする．3章では接触状態が与えられたときの未知パラメータ同定法を示す．

なお，面接触の未知パラメータが同定できないことは文献(6)より明らかなので本論文では面接触の評価関数は除く．

3・1 点接触の未知パラメータ同定法 式(4)，(13)より点接触の場合の評価関数は

$$J_p=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\|A_i\boldsymbol{x}-\boldsymbol{b}_i\|^2 \quad\cdots\cdots(14)$$

となる．J_p を最小にする未知パラメータ $\boldsymbol{x}$ は

$$\hat{\boldsymbol{x}}=\left(\sum_{i=1}^{k}A_i^TA_i\right)^{-1}\left(\sum_{i=1}^{k}A_i^T\boldsymbol{b}_i\right)\quad\cdots\cdots(15)$$

と与えられる．

3・2 ソフトフィンガ接触の未知パラメータ同定法

3・2・1 ソフトフィンガ接触①の場合 式(5)，(13)より，ソフトフィンガ接触①の場合の評価関数は

$$J_{s1}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\|A_i\boldsymbol{x}+[1\quad 0\quad 0]^Tz_i-\boldsymbol{b}_i\|^2$$
$$=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\|A_{i1}\boldsymbol{x}+z_i-b_{i1}\|^2+\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\|\bar{A}_i\boldsymbol{x}-\bar{\boldsymbol{b}}_i\|^2 \quad\cdots\cdots(16)$$

となる．ただし，

$$A_i=\begin{bmatrix}A_{i1}\\ \bar{A}_i\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{b}_i=\begin{bmatrix}b_{i1}\\ \bar{\boldsymbol{b}}_i\end{bmatrix}$$

J_{s1} を最小にする z_i は第1項より

$$\hat{z}_i=b_{i1}-A_{i1}\hat{\boldsymbol{x}}$$

と与えられる．また，第2項より最小にする $\boldsymbol{x}$ は

$$\hat{\boldsymbol{x}}=\left(\sum_{i=1}^{k}\bar{A}_i^T\bar{A}_i\right)^{-1}\left(\sum_{i=1}^{k}\bar{A}_i^T\bar{\boldsymbol{b}}_i\right)\quad\cdots\cdots(17)$$

と与えられる．

3・2・2 ソフトフィンガ接触②の場合 式(6)，(13)より，ソフトフィンガ接触②の場合の評価関数は

$$J_{s2}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\|A_i\boldsymbol{x}+[y\quad 1\quad 0]^Tz_i-\boldsymbol{b}_i\|^2 \quad\cdots\cdots(18)$$

となる．まず z_i について最小化すると $\partial J_{s2}/\partial z_i=0$ より

$$(y^2+1)z_i=y(b_{i1}-A_{i1}\boldsymbol{x})+(b_{i2}-A_{i2}\boldsymbol{x}) \quad\cdots\cdots(19)$$

J_{s2} を $\boldsymbol{x}$, y について最小化するために次のように変形する．

$$J_{s2}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left\|\begin{bmatrix}A_{i1} & z_i\\ A_{i2} & 0\\ A_{i3} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}\\ y\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}b_{i1}\\ b_{i2}-z_i\\ b_{i3}\end{bmatrix}\right\|^2$$

したがって，J_{s2} を最小にする $\boldsymbol{x}$, y は

$$\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{k}A_i^TA_i & \sum_{i=1}^{k}A_{i1}{}^Tz_i\\ \sum_{i=1}^{k}A_{i1}z_i & \sum_{i=1}^{k}z_i^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}\\ y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{k}(A_i^T\boldsymbol{b}_i-A_{i2}{}^Tz_i)\\ \sum_{i=1}^{k}b_{i1}z_i\end{bmatrix} \quad\cdots\cdots(20)$$

となる．J_{s2} を最小にする $\boldsymbol{x}, y, z_1, \cdots, z_k$ は式(19)，(20)の連立方程式の解である．しかし，非線形性が高い．よって，次のような手順で未知パラメータの推定値を得る．

step 1 文献(6)で非線形推定問題が線形推定問題に帰着されることを示したので，その式を利用し最小二乗法を用いて初期値を決定する．

step 2 z_i の値を固定して，式(20)より J_{s2} を最小にする $\hat{\boldsymbol{x}}$, $\hat{y}$ を求める．

step 3 $\boldsymbol{x}$, y の値を固定して，式(19)より J_{s2} を最小にする $\hat{z}_i$ を求める．

以下 step 2, 3 の計算をある収束条件を満たすまで繰返す．

3・2・3 ソフトフィンガ接触③の場合 式(7)，(13)より，ソフトフィンガ接触③の場合の評価関数は

$$J_{s3}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\|A_i\boldsymbol{x}+[y_1\quad y_2\quad 1]^Tz_i-\boldsymbol{b}_i\|^2 \quad\cdots\cdots(21)$$

となる．まず z_i について最小化すると

$$(y_1^2+y_2^2+1)z_i=y_1(b_{i1}-A_{i1}\boldsymbol{x})+y_2(b_{i2}-A_{i2}\boldsymbol{x})+(b_{i3}-A_{i3}\boldsymbol{x}) \quad\cdots\cdots(22)$$

J_{s3} を $\boldsymbol{x}$, y_1, y_2 について最小化するために次のように変形する．

$$J_{s3}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left\|\begin{bmatrix}A_{i1} & z_i & 0\\ A_{i2} & 0 & z_i\\ A_{i3} & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}\\ y_1\\ y_2\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}b_{i1}\\ b_{i2}\\ b_{i3}-z_i\end{bmatrix}\right\|^2 \quad\cdots\cdots(23)$$

したがって，$\boldsymbol{x}$, y_1, y_2 についての最小化の式は次のようになる．

$$\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{k}A_i^TA_i & \sum_{i=1}^{k}A_{i1}{}^Tz_i & \sum_{i=1}^{k}A_{i2}{}^Tz_i\\ \sum_{i=1}^{k}A_{i1}z_i & \sum_{i=1}^{k}z_i^2 & 0\\ \sum_{i=1}^{k}A_{i2}z_i & 0 & \sum_{i=1}^{k}z_i^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}\\ y_1\\ y_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{k}(A_i^T\boldsymbol{b}_i-A_{i3}{}^Tz_i)\\ \sum_{i=1}^{k}b_{i1}z_i\\ \sum_{i=1}^{k}b_{i2}z_i\end{bmatrix} \quad\cdots\cdots(24)$$

ソフトフィンガ接触②と同様の手順で未知パラメータを推定する．

3・3 線接触の未知パラメータ同定法

3・3・1 線接触①の場合 式(8)，(13)より，線接

触①の場合の評価関数は

$$J_{l1}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left\|A_i\boldsymbol{x}+\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\end{bmatrix}^T\begin{bmatrix}z_{i1}\\z_{i2}\end{bmatrix}-\boldsymbol{b}_i\right\|^2$$

$$=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\|A_{i1}\boldsymbol{x}+z_{i1}-b_{i1}\|^2+\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\|A_{i2}\boldsymbol{x}+z_{i2}-b_{i2}\|^2+\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\|A_{i3}\boldsymbol{x}-b_{i3}\|^2 \quad\cdots\cdots(25)$$

となる．J_{l1} の最小解は

$$\hat{z}_{i1}=b_{i1}-A_{i1}\hat{\boldsymbol{x}} \quad\cdots\cdots(26)$$

$$\hat{z}_{i2}=b_{i2}-A_{i2}\hat{\boldsymbol{x}} \quad\cdots\cdots(27)$$

$$\left(\sum_{i=1}^{k}A_{i3}{}^TA_{i3}\right)\hat{\boldsymbol{x}}=\sum_{i=1}^{k}A_{i3}{}^Tb_{i3} \quad\cdots\cdots(28)$$

の解として与えられる．しかし，式(28)は

$$\begin{bmatrix}*&*&0\\ *&*&0\\ 0&0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{x}_1\\ \hat{x}_2\\ \hat{x}_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}*\\ *\\ 0\end{bmatrix}$$

の形をしている．したがって，$\hat{x}_1$, $\hat{x}_2$ は一意に決まるが，$\hat{x}_3$ は任意の実数 t で式(28)が成り立つ．つまり，接触線は次のようになる．

$$\hat{\boldsymbol{x}}=\begin{bmatrix}\left(\sum_{i=1}^{k}\tilde{A}_{i3}{}^T\tilde{A}_{i3}\right)^{-1}\sum_{i=1}^{k}\tilde{A}_{i3}{}^Tb_{i3}\\ 0\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix}t \quad\cdots\cdots(29)$$

ただし，

$$A_{i3}=[\tilde{A}_{i3}\quad 0]$$

とする．これは接触点が接触線上で任意に設定できることに一致する．

3･3･2 線接触②の場合 式(9)，(13)より，線接触②の場合の評価関数は

$$J_{l2}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left\|A_i\boldsymbol{x}+\begin{bmatrix}1&0&0\\0&y&1\end{bmatrix}^T\begin{bmatrix}z_{i1}\\z_{i2}\end{bmatrix}-\boldsymbol{b}_i\right\|^2$$

$$=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\|A_{i1}\boldsymbol{x}+z_{i1}-b_{i1}\|^2+\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\|\bar{A}_i\boldsymbol{x}+[y\quad 1]^Tz_{i2}-\bar{\boldsymbol{b}}_i\|^2 \quad\cdots\cdots(30)$$

となる．第1項を最小にする z_{i1} は

$$z_{i1}=b_{i1}-A_{i1}\boldsymbol{x}$$

である．まず，z_{i2} について最小化すれば

$$(y^2+1)z_{i2}=y(b_{i2}-A_{i2}\boldsymbol{x})+(b_{i3}-A_{i3}\boldsymbol{x}) \quad\cdots(31)$$

となる．J_{l2} の第2項は次のように変形される．

$$\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left\|\begin{bmatrix}A_{i2}&z_{i2}\\A_{i3}&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}\\y\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}b_{i2}\\b_{i3}-z_{i2}\end{bmatrix}\right\|^2$$

したがって，J_{l2} を最小にする $\boldsymbol{x}$, y は

$$\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{k}\bar{A}_i^T\bar{A}_i & \sum_{i=1}^{k}A_{i2}{}^Tz_{i2}\\ \sum_{i=1}^{k}A_{i2}z_{i2} & \sum_{i=1}^{k}z_{i2}{}^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}\\y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{k}(\bar{A}_i^T\bar{\boldsymbol{b}}_i-A_{i3}{}^Tz_{i2})\\ \sum_{i=1}^{k}b_{i2}z_{i2}\end{bmatrix} \quad\cdots\cdots(32)$$

となる．ソフトフィンガ接触②と同様の手順で未知パラメータを推定する．

3･3･3 線接触③の場合 式(10)，(13)より，線接触③の場合の評価関数は

$$J_{l3}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left\|A_i\boldsymbol{x}+\begin{bmatrix}y_1&1&0\\y_2&0&1\end{bmatrix}^T\begin{bmatrix}z_{i1}\\z_{i2}\end{bmatrix}-\boldsymbol{b}_i\right\|^2 \quad\cdots(33)$$

となる．z_{i1}, z_{i2} について最小化すると

$$\begin{bmatrix}y_1{}^2+1 & y_1y_2\\ y_1y_2 & y_2{}^2+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}z_{i1}\\z_{i2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}(y_1A_{i1}+A_{i2})\boldsymbol{x}-(y_1b_{i1}+b_{i2})\\ (y_2A_{i1}+A_{i3})\boldsymbol{x}-(y_2b_{i1}+b_{i3})\end{bmatrix} \quad\cdots\cdots(34)$$

を得る．また J_{l3} は次のように変形される．

$$J_{l3}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left\|\begin{bmatrix}A_{i1}&z_{i1}&z_{i2}\\A_{i2}&0&0\\A_{i3}&0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}\\y_1\\y_2\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}b_{i1}\\b_{i2}-z_{i1}\\b_{i3}-z_{i2}\end{bmatrix}\right\|^2$$

したがって，$\boldsymbol{x}$, y_1, y_2 についての最小化の式は次のようになる．

$$\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{k}A_i^TA_i & \sum_{i=1}^{k}A_{i1}{}^Tz_{i1} & \sum_{i=1}^{k}A_{i2}{}^Tz_{i2}\\ \sum_{i=1}^{k}A_{i1}z_{i1} & \sum_{i=1}^{k}z_{i1}{}^2 & \sum_{i=1}^{k}z_{i1}z_{i2}\\ \sum_{i=1}^{k}A_{i2}z_{i2} & \sum_{i=1}^{k}z_{i1}z_{i2} & \sum_{i=1}^{k}z_{i2}{}^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}\\y_1\\y_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{k}(A_i^T\boldsymbol{b}_i-A_{i2}{}^Tz_{i1}-A_{i3}{}^Tz_{i2})\\ \sum_{i=1}^{k}b_{i1}z_{i1}\\ \sum_{i=1}^{k}b_{i1}z_{i2}\end{bmatrix} \quad\cdots\cdots(35)$$

ソフトフィンガ接触②と同様の手順で未知パラメータを推定する．

4. 接触状態の判別

真の接触状態が2･3節で挙げた八つの接触状態のいづれであるか未知であるときに，計測データより接触状態を判別する方法を示す．

4･1 評価関数の関係 2･3節の $\boldsymbol{n}_{ci}$ の表現から評価関数の大小関係を調べる．ただし，最小化したと

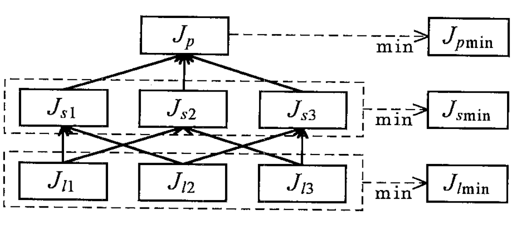


Fig. 2 Relationship of criteria

きの評価関数値を $J_{p\min}, J_{s1\min}, \cdots, J_{l3\min}$ で表す．例として，線接触①の表現について考える．式(8)において $z_{i2}=0$ とおけばソフトフィンガ接触①の表現となる．また $z_{i1}=yz_{i2}$ とおけばソフトフィンガ接触②の表現が得られる．図2はこのような表現の関係を示したものである．矢元のパラメータを特定化することにより矢先の表現が得られることを示す．したがって，評価関数値は矢先のほうが必ず大きくなる．一方，線接触①，②，③の表現は互いに独立である[6]．このため真の接触状態が①の場合，①として計算した値 $J_{l1\min}$ が②または③として計算した値 $J_{l2\min}, J_{l3\min}$ より必ず小さい．したがって線接触の範囲内では $J_{l1\min}$, $J_{l2\min}, J_{l3\min}$ の最小値から接触状態を決定することができる．ソフトフィンガ接触も同様である．

$$J_{s\min}=\min\{J_{s1\min}, J_{s2\min}, J_{s3\min}\} \quad \cdots\cdots(36)$$

$$J_{l\min}=\min\{J_{l1\min}, J_{l2\min}, J_{l3\min}\} \quad \cdots\cdots(37)$$

とおく．$J_{p\min}, J_{s\min}, J_{l\min}$ から接触状態が特定化できることを図2の点線矢印で示す．

4・2　ノイズを含まない場合の評価関数の関係

計測データにノイズが含まれていなければ真の接触が点接触の場合には，$J_{p\min}=0$ となり，したがって

$$J_{p\min}=J_{s\min}=J_{l\min}=0$$

ソフトフィンガ接触の場合には，$J_{s\min}=0$ となり

$$J_{p\min}>J_{s\min}=J_{l\min}=0$$

線接触の場合には，$J_{l\min}=0$ となり

$$J_{p\min}>J_{s\min}>J_{l\min}=0$$

面接触の場合には，

$$J_{p\min}>J_{s\min}>J_{l\min}>0$$

となる(図3)．「$J_{p\min}, J_{s\min}, J_{l\min}$ の順に見ていくと真の接触状態を表す評価関数のときに初めて零になる」ことがわかる．

4・3　ノイズを含む場合の評価関数の関係

計測データにノイズを含む場合についてシミュレーションした結果，図4のような傾向が見られた．図3に比べノイズの分だけ評価関数の値が増加しているが，ノイズを含まない場合の評価関数の大小関係は維持されている．そこで，図4(a)～(d)の網かけ部分の共通する範囲の中からある値 α を選べば，以下のような関係を満たすことができる．

真の接触が点接触の場合には，

$$\alpha \geq J_{p\min} \geq J_{s\min} \geq J_{l\min} \quad \cdots\cdots(38)$$

ソフトフィンガ接触の場合には，

$$J_{p\min}>\alpha \geq J_{s\min} \geq J_{l\min} \quad \cdots\cdots(39)$$

線接触の場合には

$$J_{p\min}>J_{s\min}>\alpha \geq J_{l\min} \quad \cdots\cdots(40)$$

面接触の場合には

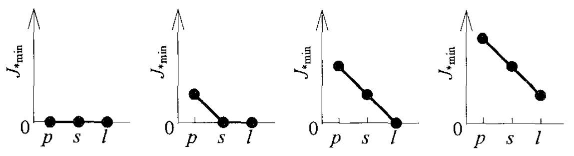
$$J_{p\min}>J_{s\min}>J_{l\min}>\alpha \quad \cdots\cdots(41)$$

となる．つまり「$J_{p\min}, J_{s\min}, J_{l\min}$ の順に見ていくと真の接触状態を表す評価関数のときに初めて値 α 以下になる」ことがわかる．この方針により未知の接触状態を判別することができる．実際のロボットハンドでは既知の接触状態で複数回の検定を事前に行い，図4をプロットすることによりしきい値 α を設定すればよい．

5. 数　値　例

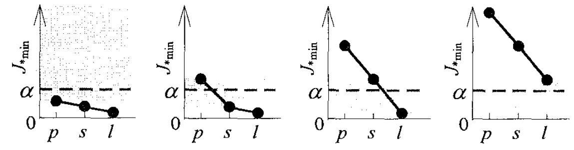
数値計算により4章で提案した手法の有効性を示す．数値計算に用いるデータ $\boldsymbol{f}_{oi}, \boldsymbol{b}_i$ は以下の手順で生成する．

（I）　接触状態(点接触～面接触)，接触点での力



（a）Point　（b）Soft　（c）Line　（d）Plane

Fig. 3　Difference among criteria without noise



（a）Point　（b）Soft　（c）Line　（d）Plane

Fig. 4　Difference among criteria with noise

Table 1　Ratio of identifying contact conditions

σ	0.01	0.03	0.05
Point	100	100	100
Soft 1	95	90	60
Soft 2	96	93	78
Soft 3	100	100	100
Line 1	91	87	57
Line 2	98	94	80
Line 3	95	94	93
Plane	100	100	100

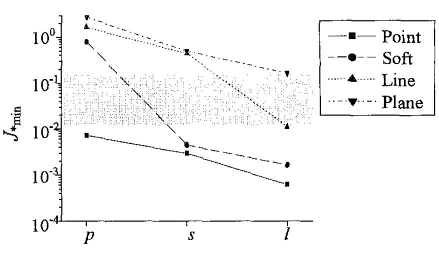


Fig. 5　Numerical examples

Table 2 Distribution of optimal contact conditions with $\sigma=0.05$

data	P	$S1$	$S2$	$S3$	$L1$	$L2$	$L3$	Pl
Point	100	0	0	0	0	0	0	0
Soft 1	0	60	13	27	0	0	0	0
Soft 2	0	0	78	22	0	0	0	0
Soft 3	0	0	0	100	0	0	0	0
Line 1	0	0	0	0	57	18	25	0
Line 2	0	0	0	0	0	80	20	0
Line 3	0	0	0	0	3	4	93	0
Plane	0	0	0	0	0	0	0	100

Table 3 Ratio of identifying contact conditions with $\sigma=0.05$

k	10	20	30
Point	100	100	100
Soft 1	60	87	99
Soft 2	78	93	100
Soft 3	100	100	100
Line 1	57	88	96
Line 2	80	95	97
Line 3	93	96	94
Plane	100	100	100

$\boldsymbol{f}_{ci}$, モーメント $\boldsymbol{n}'_{ci}$, $i=1,2,\cdots,k$ の各成分を与える．ただし，平均 0，標準偏差 1 とする．また，回転行列を R とし，$\boldsymbol{n}_{ci}$ は

$$\boldsymbol{n}_{ci}=R\boldsymbol{n}'_{ci},\quad i=1,\cdots,k$$

で与えられる．ここで R, $\boldsymbol{n}'_{ci}$ は接触状態に対応して変化する(6)．

(II) 接触点位置 $\boldsymbol{r}_c=\boldsymbol{x}$ を与える．

(III) 平均 0，標準偏差 σ となるノイズ $\boldsymbol{\varepsilon}_i$, $i=1,2,\cdots,k$ の各成分を与える．

(IV) 計測される力 $\boldsymbol{f}_{oi}$, モーメント $\boldsymbol{b}_i$ を求める．

$$\boldsymbol{f}_{oi}=\boldsymbol{f}_{ci}$$

$$\boldsymbol{b}_i=\boldsymbol{x}\times\boldsymbol{f}_{ci}+\boldsymbol{n}_{ci}+\boldsymbol{\varepsilon}_i,\quad i=1,2,\cdots,k$$

収束条件は $\|\boldsymbol{X}_l-\boldsymbol{X}_{l-1}\|^2/\|\boldsymbol{X}_l\|^2\leq 0.001$ とする．ただし，$\boldsymbol{X}_l$ は l 回めの繰返しのときの解を要素とするベクトルである．例えば，ソフトフィンガ接触②の場合には $\boldsymbol{X}_l=[x_1\ x_2\ x_3\ y\ z_1\ z_2\ \cdots\ z_k]^T$ とする．$\sigma=0.05$ の場合の計算例を図5に示す．ただし，見やすくするため図3, 4とは異なり縦軸を対数でとる．網かけ部分が共通する範囲である．そこでしきい値 α を 0.05 と設定する．このしきい値をもとに接触状態を同定する．

計測モーメント $\boldsymbol{b}_i$ の各成分に $\sigma=0.01$, $\sigma=0.03$, $\sigma=0.05$ のノイズを加えて，計測回数を $k=10$ として数値計算を各データ 100 回ずつ行ったところ，表1の確率で正しく接触状態を同定できた．同定確率がノイズに影響されることがわかる．$\sigma=0.05$ のときに同定された接触状態の分布を表2に示す．ただし，Pl は面接触と同定された回数を表現している．ソフトフィンガ接触①のデータは，ソフトフィンガ接触②③と同定され同定確率が低くなっている．これはノイズの増加が接触モーメント $\boldsymbol{n}'_{ci}$ にではなく，回転行列 R に影響していると推定される．線接触のデータも同様のことが推定される．しかし，表3に示すように計測回数 k を増やすことで高い同定確率を実現できる．以上より本手法は有効だと考えられる．

6. 結　言

本報では，把握対象物の形状，接触位置および接触状態が未知という状況においてこれらの未知接触パラメータをノイズを考慮して同定する問題を取扱った．本報では，未知接触パラメータの同定には文献(6)を利用し初期値を求め，次いで評価関数を最小にする未知パラメータを繰返し計算により求めた．また，評価関数の大小関係から，接触状態の同定アルゴリズムを提案した．本手法では，接触状態と接触点の位置だけではなく，接触線の方向なども容易に計算することができる．また，計測データのノイズ等の誤差を考慮した手法のため，組立などの精密な位置決めを要する実際の作業などにも応用可能である．

文　献

(1) 永田和之・小笠原司・高瀬國克, 接触情報を用いたロボットの把握位置姿勢の推定, 計測制御学会論文集, **28**-7(1992), 783-789.
(2) 北垣高成・小笠原司・末広尚士, 力覚センシングによる接触状態検出, 日本機械学会ロボメカ講演会予稿集, A(1991-6), 45-48.
(3) 三村宣治・舟橋康行, 二次元平面内における2本指ロボットハンドの把握パラメータ同定, 機論, **58**-554, C(1992), 175-181.
(4) 舟橋康行・楯將博, アクティブセンシングを用いた包み込み把握の接触点同定, 機論, **61**-589, C(1995), 3607-3613.
(5) 三村宣治・舟橋康行, アクティブセンシングによる接触パラメータ同定, 機論, **60**-579, C(1994), 3816-3821.
(6) 三村宣治・舟橋康行・毛利哲也, 接触パラメータの同定アルゴリズム, 機論, **63**-610, C(1997), 2061-2068.
(7) Mason, M. T. and Salisbury, J. K., *Robot Hands and the Mechanics of Manipulation*, (1985), 8, Cambridge, MA, MIT Press.